

## 지표면 임피던스에 의한 소음의 초과감쇠에 관한 연구

### Effects of the Finite Ground Impedance on the Excess Attenuation of Noise

김 동 일\*, 강 병 용\*, 장 호 경\*\*, 김 예 현\*

(Dong-Il Kim\*, Byoung-Yong Kang\*, Ho-Gyeong Chang\*\*, Ye-Hyun Kim\*)

#### 요 약

본 연구에서는 초지, 흙으로 된 표면, 아스팔트, 시멘트도로 등의 지표면 위의 자유공간에서 정상파 방법을 이용하여 음향 임피던스를 측정하였으며, 음의 초과감쇠를 조사하였다. 사용한 주파수의 범위는 300Hz에서 1000Hz이며, 각 지표면의 음향 임피던스를 측정된 결과 Delany와 Bazley의 이론식과 비교적 잘 일치하였다. 음향임피던스는 초지, 흙, 아스팔트, 시멘트 도로의 순으로 커지고, 주파수가 증가하면 그 값은 감소한다. 음의 초과감쇠는 주로 지표면의 음향임피던스에 의해 좌우됨을 확인하였으며, 각 지표면과 마이크로폰의 높이에 따른 이론치와 실험결과를 비교하였다.

#### ABSTRACT

In this study, the ground impedance is measured using the standing wave method in a free field on the grass, the soil, and the ground covered with asphalt and cement. And the excess attenuation of sound is investigated. Results are obtained in the frequency range between 300Hz and 1000Hz. There are very good agreements between the results of the measured ground impedance and the prediction of Delany and Bazley. The ground impedance is increased in order the grass, the soil, the asphalt and the cement road, decreased with frequency for each the ground. The excess attenuation of sound is mainly determined by the ground impedance. The experimental results of the excess attenuation over the different ground types and the microphone heights are compared with the theoretical values.

#### 1. 서 론

교통소음 및 산업소음등의 환경소음을 감쇠시키기 위한 대처 방법은 소음발생원의 발생소음 자체를 줄이는 방법과 방음벽등의 시설물을 이용하여 소음의

전파경로를 차단하는 방법이 있다. 방음벽등의 시설물을 이용하여 소음을 감쇠 시키고자 할 때는 소음전파 제어요소인 온도, 습도, 공기에 의한 산란, 지표면의 기하학적 구조와 음향임피던스등 물리적 기본요소에 대한 연구가 선행 되어야 한다.

소음원에서 수음점까지의 소음의 전파는 지표면의 음향임피던스에 의한 소음의 반사와 흡수등에 가장 크게 의존한다. 매질의 음향임피던스를 측정하기 위한

\*영남대학교 물리학과

\*\*경산대학교 물리학과

접수일자: 1993년 12월 21일

방법은 임피던스 튜브 이용법, 자유공간(free field) 측정법, 임피던스 미터법등이 있다. 임피던스 튜브법은 정상파의 최대 및 최소음압의 크기와 위치를 이용하여 측정하는 정상파비 방법(standing wave ratio method)<sup>(1,4)</sup>과 1977년 Seybert<sup>(5,6)</sup> 등에 의해 발전된 전달함수방법(transfer function method)이 있다. 자유공간 측정법은 Dickinson<sup>(7,8)</sup> 등에 의해 초지의 두 계를 고려한 실험결과등이 보고되었으며, 전자산업의 발달로 정밀한 측정장비가 개발되어 1980년대에 자유공간에서 두개의 마이크로폰을 이용한 측정방법과 연구가 J. F. Allard<sup>(9,10)</sup> 등에 의해 활발히 진행되었다. Zuckerwar<sup>(11)</sup>는 음파의 체적속도(volume velocity)와 음압을 직접 측정 할 수 있는 임피던스 미터를 제작하여 연구하였으나, 복잡하고 정밀한 장치의 제작이 어렵고 장치의 주파수 응답을 정확하게 알아야 하는 단점이 있다. Chessell<sup>(12-17)</sup> 등은 1개의 요소인 통기저항에 의한 소음의 감쇠특성과 지표면의 다공성을 고려한 감쇠특성의 이론적, 실험적 연구결과를 보고하였다.

본 연구에서는 환경소음의 여러 전파 경로 중에서 초지, 흙으로 된 지표면, 아스팔트, 시멘트 도로등을 대상으로 소음의 감쇠특성을 조사하였다. 임피던스 튜브의 재질이 미치는 영향과 시료 제작의 관련성이 없으며 소음원이 있는 지역의 습도와 지표면의 구성이 다르기 때문에 소음원 주위의 넓은 지표면에 대하여 자유공간에서의 측정방법을 이용하여 음향임피던스를 측정하였다. 음향임피던스에 의한 소음의 감쇠특성을 조사하기 위하여 주위의 반사물체가 없는 지역에서 지표면의 종류와 수음점의 높이를 변화시켜 지표면 음향임피던스에 대한 소음의 초과감쇠 값을 실험적으로 조사하였다.

## II. 이 론

소음의 감쇠에 영향을 미치는 요소로는 지표면의 흡수손실, 바람과 온도에 의한 공기의 굴절, 공기에 의한 음파의 산란과 흡수, 불규칙적인 공기의 요동등이 있다. 유한한 음향임피던스를 가지고 있는 지표면을 경계로 하여 음파가 전파 될때 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지표면의 임피던스에 의한 흡수손실과 음원과 수음점의 기하학적인 경로이다.

Fig.1과 같이 자유공간에서 정상파 방법에 의한 음향임피던스를 측정하기 위해서 음파의 파장을 고려

하여 가능한 한 높은 위치에 음원을 지표면에 수직하게 설치하고 음을 발생 시키면 수음점에 도달 되는 입사파와 반사파의 합성음압은 다음과 같이 표현된다.<sup>(7)</sup>

$$p = \frac{p_i e^{j(\omega t - kr)}}{4\pi r} + \frac{p_r e^{j(\omega t - kr')}}{4\pi r'} \quad (1)$$

(1)식에서  $p_i$ 와  $p_r$ 는 입사파와 반사파의 음압크기이며  $\omega$ ,  $k$ ,  $t$ 는 각주파수(angular frequency), 파수(wave number), 시간(time)이다.

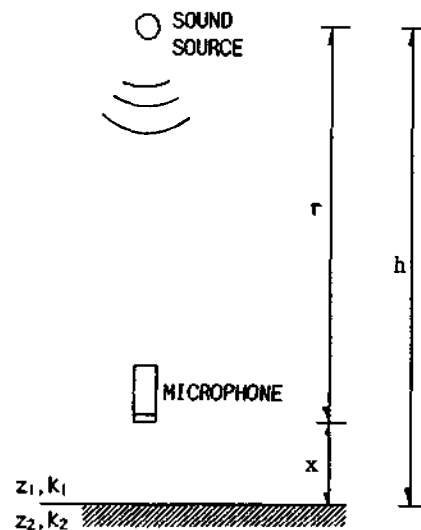


Fig 1. Schematic diagram for the measurement of ground impedance by using free-field method.

지표면에서 음원까지 수직높이는  $h$ , 지표면에서 음압 측정점까지 거리는  $x$ , 음원과 지표면사이의 수직선상에서  $r = h - x$ 이며  $r' = h + x$ 이다. 지표면의 음향임피던스는 음압을 지표면에서 음파의 입사속도( $u_n$ )로 나눈 값이므로 (2)식과 같다.

$$z = \left( \frac{p}{u_n} \right)_{x=0} = - \frac{1 + \frac{p_r}{p_i}}{(1 + 1/jkh) - \frac{p_r}{p_i} (1 + 1/jkh)} \quad (2)$$

$kh \rightarrow \infty$  일 때  $1 + 1/jkh$ 는 1이 되며, 입사음압과 반사음압의 비가 반사계수(reflection coefficient)이므로 반사계수를 음향임피던스로 나타내어 다음과 같이

는다.

$$-R = \frac{p_0}{p} = \frac{z_0 + 1}{z_0 - 1} = e^{i(\alpha_0 + \beta_0)} \quad (3)$$

(3)식을 (1)식에 대입하여 음압의 크기로 나타내면 (4)식과 같다.

$$|p| = A \left[ \cosh^2 \pi \left( \alpha_0 - \frac{x}{\pi h} \right) - \cos^2 \pi \left( \beta_0 - \frac{kx}{\pi} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서 A는 진폭이며 지표면 음향임피던스는 (5)식으로 표현된다.

$$z = \frac{k}{k'} \tanh \pi \left[ \left( \alpha_0 - \frac{x}{\pi h} \right) + j \left( \beta_0 - \frac{kx}{\pi} \right) \right] \quad (5)$$

(4)식과 (5)식에서 음압의 크기와 위치로부터  $\alpha_0$ 와  $\beta_0$ 를 결정하면 지표면의 음향임피던스를 구할 수 있다. 첫번째와 두번째 최소음압의 위치를  $d_1$ 과  $d_2$ , 첫번째 최대음압의 위치를  $d_3$ 라고 하면  $\alpha_0$ 는 다음식에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta L(\text{dB}) = 20 \log \frac{\cosh \pi \left[ \alpha_0 + \left( \frac{d_3}{\pi h} \right) \right]}{\sinh \pi \left[ \alpha_0 + \left( \frac{d_1}{\pi h} \right) \right]} \quad (6)$$

$\Delta L$ 은 첫번째 최대음압과 첫번째 최소음압의 차이이다. (4)식에서  $\cos^2 \pi \left( \beta_0 - \frac{kx}{\pi} \right) = 1$ 을 만족하는  $\beta_0$ 의 값을 구하면 (7)식과 같다.

$$\beta_0 = 1 - \frac{d_1}{d_2} \quad (7)$$

첫번째 최소음압의 위치와 두번째 최소음압의 위치를 알면  $\beta_0$ 를 구할 수 있다.

Fig.2에서와 같이 두 매질로 분리되어 있는 경계면 위에 음원과 마이크론이 위치해 있을 때 경계면에서 음원의 높이를  $h_s$ , 마이크론의 높이를  $h_r$ , 경계면 위의 음원에서 D만큼 떨어져 있는 마이크론까지의 직경과 전파경로를  $r_1$ , 지면에서 반사되어 도달하는 반사파의 경로를  $r_2$ 로 둔다. 경계면 위의 매질은 공기이며 경계면 아래의 매질은 특성 음향임피던스를 가진다. 음원에서 발생된 구면파가 마이크론에 도달할 때 음의 velocity potential은 다음과 같다.<sup>(12)</sup>

$$\Phi = \frac{e^{i(k_1 r_1)} }{r_1} [1 + Q e^{i(k_2 r_2)}] \quad (8)$$

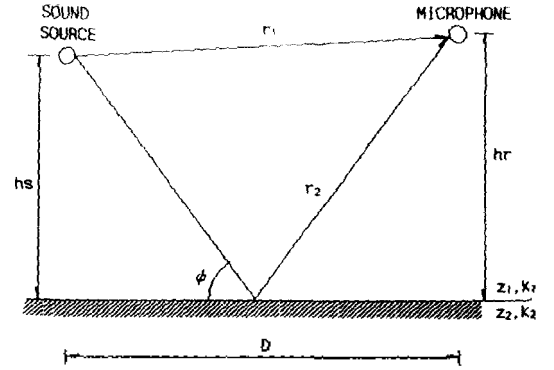


Fig 2. Schematic diagram for the measurement of excess attenuation on ground.

$\Delta r$ 은 반사파와 직경파의 경로차이며 Q는 image source의 강도로서  $Q = R + (1-R)F(w)$ 이다. R은 반사계수이며, F(w)와 w는 각각 boundary loss factor와 numerical distance이다. 이들 항을 구하는 식은 다음식과 같다.

$$R = \frac{\sin \psi_1 - z_1/z_2 [1 - (k_1/k_2)^2 \cos^2 \psi]^{1/2}}{\sin \psi_1 + z_1/z_2 [1 - (k_1/k_2)^2 \cos^2 \psi]^{1/2}} \quad (9)$$

$$w = \frac{e^{i(k_1 r_1)}}{(1-R)^2 \cos^2 \psi} \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{k_1}{k_2} \right)^2 \cos^2 \psi \right] \quad (10)$$

$$F(w) = 1 + 2j \sqrt{w\pi} e^{-w} [1 - \text{erf}(-j\sqrt{w})] \quad (11)$$

$k_1$ 과  $k_2$ 는 공기에서의 지표면에서의 음파의 파수이다.  $\psi$ 는  $\sin \psi = (h_s + h_r)/r_2$ 로 결정되는 각도이며,  $r_1 = r_2$ 일 때  $\sin \psi = h_r/r_1$ 이 된다.  $z_1 (= \rho c)$ 는 공기의 음향임피던스이며,  $z_2$ 는 (5)식으로 부터 구한 지표면의 음향임피던스이다. F(w)는 유한한 음향임피던스를 가지는 지표면에서 파면의 상호작용을 나타내는 함수로써  $k_1$ 과  $k_2$ ,  $r_1$ 과  $r_2$ ,  $z_1/z_2$ ,  $\psi$ 의 함수가 된다. 그러므로 지표면의 음향임피던스와 파수 그리고 음원과 마이크론사이의 거리와 높이를 알면 전파되는 음장의 특성을 예측할 수 있다. 자유공간에서 각 주파수별로 거리의 역자승법칙에 의해 감쇠된 음압 레벨을 기준 음압레벨로 하여 측정한 음압레벨과의

상대적인 값을 초과감쇠(excess attenuation)라고 한다. 지표면의 음향임피던스에 의한 초과감쇠는 다음식에 의해 구한다.<sup>14)</sup>

$$Ae(\text{excess attenuation}) = 20 \log \left| 1 + \left( \frac{r_1}{r_2} \right) Q \exp(ik_1 \Delta r) \right| \quad (12)$$

Q를 구하고  $r_1$ 과  $r_2$ 를 구하면 초과감쇠를 예측할 수 있다. 음의 선파에 있어서 지표면의 흡수효과를 계산할 때 직접파와 반사파의 간섭을 가정하였으나 실제 바람과 온도의 무질서한 요동은 마이크로폰에서의 신호의 위상과 진폭에 요동을 일으킨다. 요동의 효과는 요동이 없는 공기에 대한 계산값에 의해 지표면의 감쇠로 환산할 수 있다. 이 환산의 번위는 공기 요동의 강도에 의존하게 되며 요동의 효과는 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 클수록 초과감쇠치를 작게 하고 초과감쇠가 일어나는 주파수의 영역을 저주파 쪽으로 이동하게 한다.

### III. 실험방법

Fig.3은 지표면의 음향임피던스를 측정하기 위한 장치도이다. 소음의 전파경로인 초지, 흡으로된 표면, 아스팔트, 시멘트도로에 대한 음향임피던스를 측정하였다. 자유공간에서 정상파 방법을 이용하여 지표

면의 음향임피던스를 측정하기 위해서는 음파의 파장을 고려하여 음원과 지표면 사이를 충분한 거리로 멀어지게 하여야 한다.

본 실험에서는 스피커의 지지대를 철제 앵글로 제작하여 지표면에서 스피커의 중심까지 수직이 되게 하였으며, 지표면에서 스피커의 중심까지의 거리를 3.5m로 하였다. 지지대 사이의 거리를  $2.4 \times 2.4$ m로 하였으며, 마이크로폰과 소음계의 거리를 같이 3m의 케이블로 연결하였다. 신호발생기에서 발생시킨 신호를 증폭 시킨후 라우드 스피커로 음을 발생시킨다. 발생된 음파는 공기를 통하여 지표면에 도달한후 지표면에서 반사되어 라우드 스피커에서 발생되어 나오는 음파와 정상파를 형성하게 된다. Sound level meter로 첫번째 최소음압과 최대음압 그리고 두번째 최소음압을 측정하고 최소및 최대음압의 위치를 1mm까지 정확하게 측정하였다.

음원으로 사용한 스피커(Marshall, CS-1019)는 직경이 0.25m, 최대입력은 40Watt이며, 스피커에서 발생된 음의 최대음압은  $kD=1$ 인 지점에서 120dB였다. 신호발생기(Myong co.Model 301c)의 주파수 특성은  $\pm 0.5\% \pm 1\text{Hz}(10\text{Hz}-10\text{KHz})$ , 출력 특성은  $\pm 0.2\text{dB}(10\text{Hz}-100\text{KHz})$ 이며, Sound Level Meter(B&K, Type2209)와 Band Pass Filter(1/30octave Filter, B&K, Type1616)의 특성은  $\pm 0.5\text{dB}(20\text{Hz}-30\text{KHz})$ 이다. 환경 소음의 발생원은 교통소음과 기계소음으

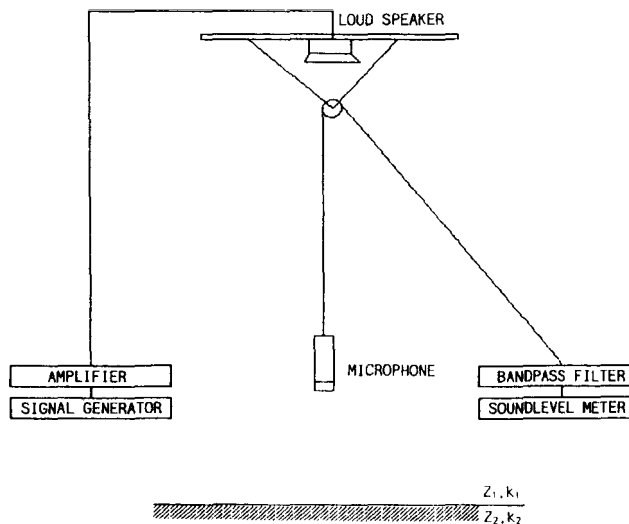


Fig 3. Experimental apparatus for the free field measurement of ground impedance.

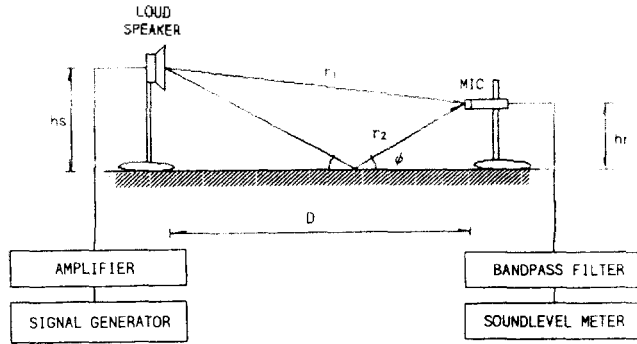


Fig 4. Experimental apparatus for the free field measurement of excess attenuation.

로 나눌 수 있다. 환경소음의 가장 큰 원인인 교통소음의 주파수 특성은 1KHz이하의 중간 저주파수 성분이 강하게 존재한다.<sup>16)</sup> 실험에 사용한 주파수 영역은 교통소음의 주파수특성을 고려하여 300Hz-1KHz로 하였으며, 1/3옥타브 밴드로 지표면에 대한 주파수별 음향임피던스를 측정하였다.

Fig.4는 지표면의 음향임피던스에 의한 소음의 초과감쇠특성을 조사하기 위한 장치도이다. 신호 발생기에서 발생시킨 신호를 증폭시켜 스피커를 통해 발생시켜 음원으로 사용하였다. 스피커를 통해 발생된 음파가 마이크로폰에 도달하는 전파경로는 주위의 물체에 반사되지 않고 공기를 통해 직접 도달하게 되는 직접파와 지표면을 경계면으로 하여 반사되어 오는 반사파등 두가지 경로가 있다. 이때  $r_1$ 과  $r_2$ 는 직접파와 반사파의 경로 크기이다. 지표면으로부터 스피커까지의 높이( $h_s$ )와 마이크로폰의 높이( $h_r$ ), 스피커에서 마이크로폰까지의 수평거리를  $D$ 라 할 때 음원과 마이크로폰까지 거리의 역자승법칙에 의해 감쇠된 음압을 기준 음압레벨로 사용하였다.

본 실험에서는 음향임피던스를 측정할 초저, 흡음으로 된 지면, 그리고 시멘트 도로를 대상으로 지표면의 음향임피던스에 의한 초과감쇠를 조사하였다. 주파수 영역은 300Hz-1KHz이며 1/3옥타브 밴드 주파수로 증가시켰다. 지표면위에 사지대를 설치하여 지표면으로부터 스피커까지의 높이( $h_s$ )를 0.6m로, 마이크로폰의 높이( $h_r$ )를 0.3m, 0.6m, 0.9m로 하였다. 스피커에서 마이크로폰까지의 수평거리( $D$ )는 7.5m이며 소음계와 측정자에 의한 반사분 줄이기 위해 케이블로 마이크로폰을 sound level meter에 연결하였으며 음압을 측정하여 초과감쇠를 조사하였다. 또

는 실험은 지표면이 10m의 길이일 때  $\pm 0.05m$ 이내의 고정차를 가지는 편평한 면에서 수행 하였으며, 지표면에서의 온도와 지표면에서 1m 높이에서의 공기의 온도차가 0.5℃ 이내 일 때도 모든 주파수에 대해 1dB 정도의 요동이 생기게 되므로<sup>17)</sup> 공기의 요동과 온도의 변화가 가장 적고 공기에 의한 굴절<sup>18)</sup>과 외부 암소음(back ground noise)의 영향을 최소화하기 위해 심야에 실험을 하였다.

#### IV. 실험결과

지표면의 음향임피던스에 의한 음의 초과감쇠는 환경적, 기하학적 조건에 의한 영향을 받을 뿐만 아니라 주파수 대역에 의한 영향이 가장 중요하므로 주파수 대역의 변화에 따른 지표면의 음향임피던스와 음의 초과감쇠 특성을 조사하였다. 자유공간에서 정상파방법을 이용하여 측정된 지표면의 음향임피던스를 교통소음과 같은 환경소음의 주파수 영역인 300Hz-1KHz의 주파수의 함수로 Fig.5-8에 나타내었다. 음향임피던스는 resistivity성분인 실수부와 reactance 성분인 허수부로 나타나는데 허수부는 음의 값을 가지며 주파수가 커짐에 따라 크기가 감소한다. 음향임피던스의 실험적 결과에 의해 유도된 Delany<sup>19)</sup>등의 식은 다음과 같다.

$$z^{-1} = 1 + 9.08(f/\sigma)^{-0.75} - j11.9(f/\sigma)^{-0.75} \quad (13)$$

$f$ : 주파수,  $\sigma$ : 동기적항으로 단위유량을 다공성 물질을 통해 내 보내는데 소요되는 압력강하(pressure drop)이며 1 cgs rayl = 1000 Pa s/m<sup>2</sup>이다.

Fig.5는 초지의 측정된 음향임피던스를 Delany<sup>(1)</sup> 등의 수파수와 통기저항의 관계식인 (13)식에 의하여 통기저항으로 나타내면  $\sigma = 170 \sim 200$ (cgs rayl)이며, 측정된 통기저항에 대한 음향임피던스의 이론치와 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig.6은 흙으로 된 표면의 측정된 음향임피던스이

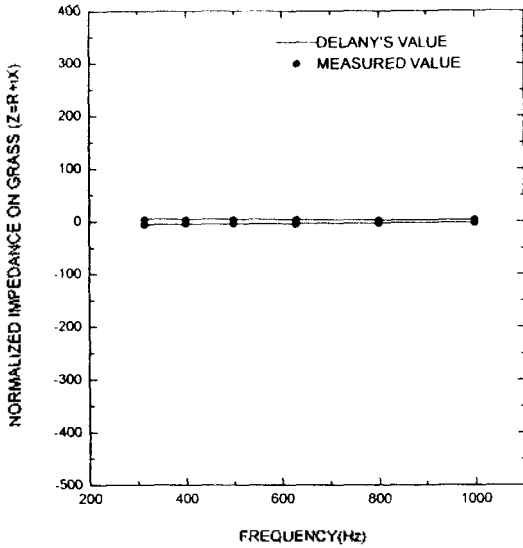


Fig 5. Comparison of the measured ground impedance with the theoretical value on grass.

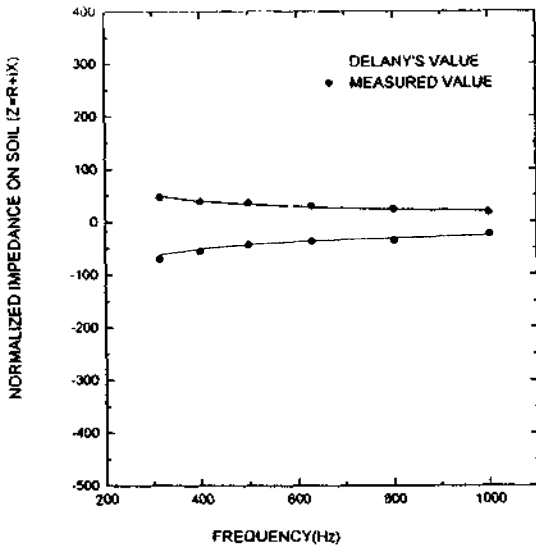


Fig 6. Comparison of the measured ground impedance with the theoretical value on soil.

며, 통기저항이  $\sigma = 2700 \sim 300$ (cgs rayl)의 값을 가지며 초지보다 나공성이 작고 표면이 단단하다는 것을 알 수 있다.

Fig.7-8은 표면이 단단한 아스팔트와 시멘트도로에 대한 음향임피던스이며 환산한 통기저항은  $\sigma = 29000 \sim 31000$ (cgs rayl)으로 거의 같은 크기의 음향임피던스

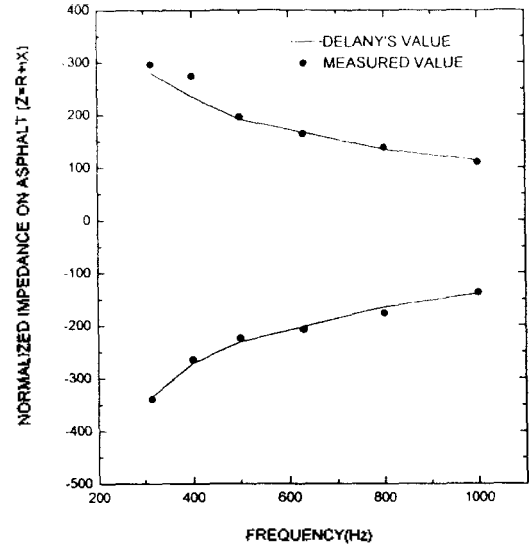


Fig 7. Comparison of the measured ground impedance with the theoretical value on asphalt.

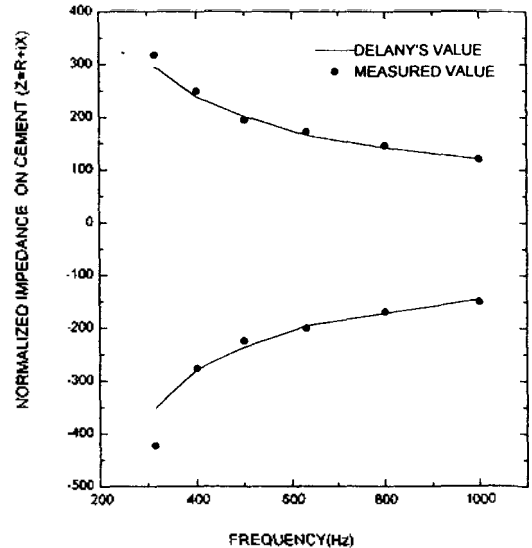


Fig 8. Comparison of the measured ground impedance with the theoretical value on cement.

를 가지고 있는 것으로 나타났다. 사유공간에서 정상파 방법에 의해 측정된 지표면의 음향임피던스와 각 지표면의 통기저항값에 의한 Delany 등의 관계식에 의한 음향임피던스값이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

지표면의 음향임피던스에 의한 소음의 초과감쇠특성을 이론적으로 살펴보면 평평한 사유면위에서 음파가 마이크로폰에 도달하게 될 때 각 주파수별 감쇠특성은 음향임피던스를 환산한 통기저항으로 기술할 수 있다. 이때 각 지표면의 특성에 따라 통기저항이 다른 값을 가지는데 지표면에서 반사되어 전파하는 반사파의 위상지연에 영향을 미친다. 단단한 지표면일 경우 즉 통기저항이 큰값을 가질때 지표면에서 반사되는 음파의 위상은 변화가 없게 되고, 단지 음원

과 마이크로폰사이의 직경과와 반사파의 경로차가 반파장의 홀수배가 될때 간섭에 의해 초과감쇠가 최소치를 나타낸다. 음원과 마이크로폰사이의 거리와 높이가 일정하면 초과감쇠의 최소치는 통기저항이 감소함에 따라 반사계수가 감소하고 반사파의 위상지연이 커짐에 따라 저주파 쪽으로 이동하게 된다.<sup>17)</sup>

Fig.9-11은 지표면의 음향임피던스의 값이 시멘트와 아스팔트는 비슷한 결과이므로 초지, 흙으로된 표면, 시멘트도로에 대한 이론치와 실험에 의한 초과감쇠치를 비교하였다. 사용한 주파수 영역은 300Hz-1KHz이며 음원과 마이크로폰사이의 거리는 7.5m, 음원의 높이는 0.6m, 마이크로폰의 높이는 각각 0.3m, 0.6m, 0.9m이다.

Fig.9는 지표면이 초지일때 음의 초과감쇠 특성이

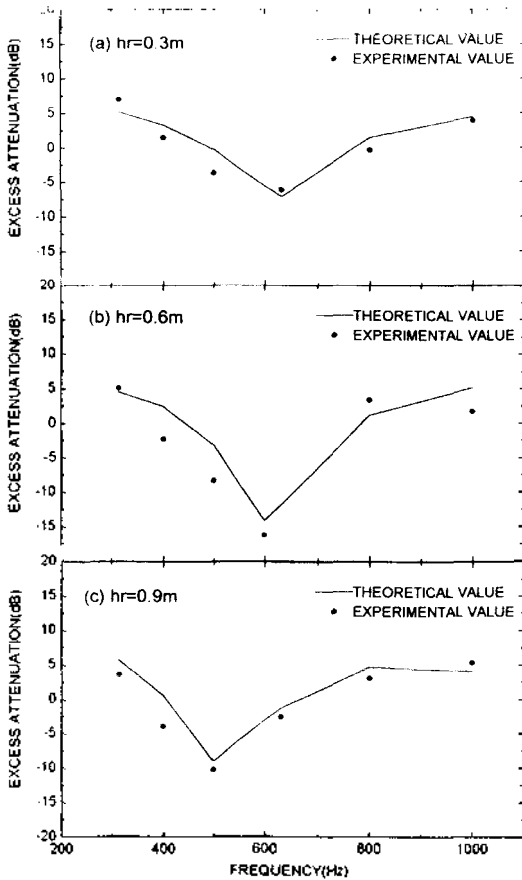


Fig 9. Comparison of the theoretical results with the measured values of excess attenuation on grass. (hs = 0.6m, D = 7.5m)

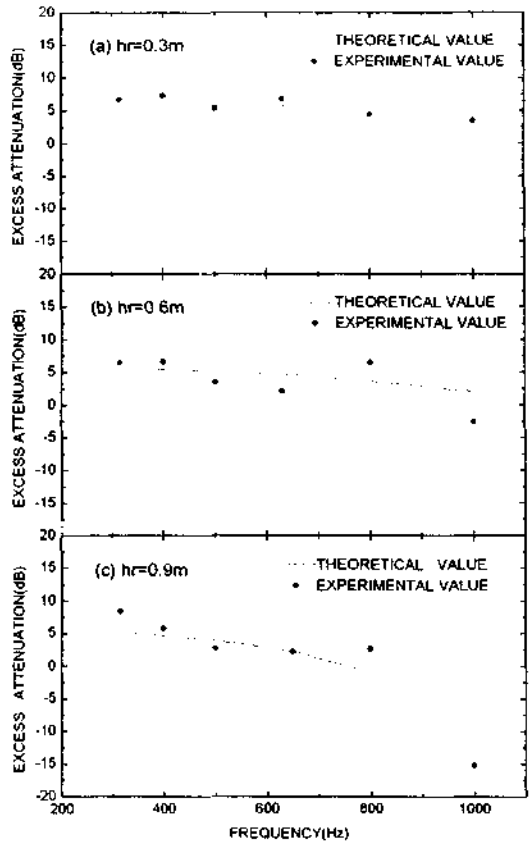


Fig 10. Comparison of the theoretical results with the measured values of excess attenuation on soil. (hs = 0.6m, D = 7.5m)

다. 통기저항이  $\sigma = 170 \sim 200$ (cgs rayl)으로서 지표면에서 반사된 음파의 위상지연으로 인해 저주파수인 600Hz영역에서 초과감쇠의 피크치가 나타났다. 초과감쇠의 곡선이 낮은 주파수에서 양의 값을 가지는 것은 직접파와 반사파의 간섭에 의한 중첩대분이기 600Hz 영역을 지나서 주파수가 높아 질수록 초과감쇠는 0에 가까워 지게 된다. 표면의 음향임피던스가 일정할 때 초과감쇠의 곡선은 음원과 마이크로폰 사이의 거리가 작고, 지표면에서의 높이가 커져 직접파와 반사파의 경로차가 클 때는 다음의 함수처럼 진동하게 된다.<sup>12)</sup>

$$(\theta + 2\pi\Delta r/\lambda) = -n\pi \quad n=2, 3, 4 \dots$$

여기서  $\theta$ 는 직접파와 반사파의 위상차이다. 그러므로 경로차에 의한 간섭의 영향으로 경로차가 반파장의 홀수배의 배수가 되는 주파수의 영역에서 초과감쇠가 일어난다. 또한 지표면의 음향임피던스가 작을 때 음의 전파에 있어서 고주파수보다 저주파수가 음향임피던스의 영향을 크게 받는다.

Fig.10은 흙으로 된 표면에서의 감쇠특성이다. 통기저항은  $\sigma = 2700 \sim 3000$ (cgs rayl)이며 마이크로폰의 높이가 0.3m, 0.6m일때는 감쇠가 일어나지 않으며 0.9m일때 800Hz에서 부터 감쇠가 시작되고 있음을 볼 수 있다. 음향임피던스가 약간 큰 흙으로된 지표면의 경우 위상의 지연이 작아지고 간섭에 의한 초기감쇠의 주파수 영역이 초지의 경우보다 고주파수로 이동하였음을 볼 수 있다.

Fig.11은 통기저항이  $\sigma = 30000$ (cgs rayl)인 시멘트 도로에 대한 실험결과이다. 단단한 표면일 경우 위상의 지연이 없으며 직접파와 반사파의 간섭으로 1KHz 영역에서 감쇠가 시작되고 있음을 볼 수 있다. 음향임피던스의 증가는 초과감쇠를 감소시키고 감쇠 피크치를 고주파수 영역으로 이동시키며 음향임피던스의 감소는 감쇠 피크치를 저주파수 영역으로 이동시킨다. 따라서 음향임피던스의 변화는 초과감쇠의 주파수 영역에 근본적인 영향을 미친다.<sup>17)</sup>

지표면에서 마이크로폰까지의 높이에 따라 초과감쇠 피크치의 주파수 영역은 마이크로폰의 높이가 커질수록 최소 피크치의 주파수 영역이 저주파수로 이동한다. 이것은 직접파와 지표면에서 반사된 반사파의 간섭에 의한 결과이다. 반사파의 위상은 직접파와 지표면에서 반사된 반사파의 경로차에 의해 늦어지

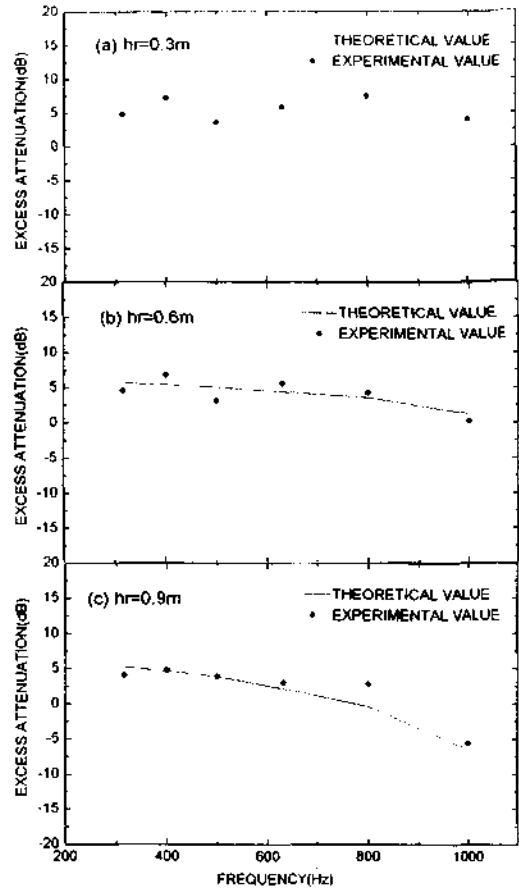


Fig 11. Comparison of the theoretical results with the measured values of excess attenuation on cement. (hs = 0.6m, D = 7.5m)

고, 지표면이 초지와 같이 다공성일 때 표면에서 음의 상호작용으로 늦어지기 때문에 마이크로폰의 높이가 증가할수록 최소 피크치의 주파수 영역이 저주파수로 이동한다. 따라서 음의 전파에 있어서 초과감쇠는 음원과 마이크로폰사이의 각도에도 의존하게 된다. 또한 마이크로폰의 높이를 고정시키고 음원의 높이를 변화 시키면 유사한 효과를 볼 수 있다.<sup>16)</sup>

### V. 결 론

자유공간에서 정상파 방법을 이용하여 초지, 흙으로 된 지표면, 아스팔트, 시멘트도로에 대하여 주파수별로 음향임피던스를 측정 하였다. 각 지표면의 음



향임피던스를 통기저항으로 환산하면 초저는  $\sigma = 170 - 200$ (cgs rayl) 혹은 코팅 표면은  $\sigma = 2700 - 3000$  (cgs rayl), 아스팔트, 시멘트도로등은  $\sigma = 20000 - 31000$ (cgs rayl)의 값을 나타내었다. Delany등<sup>1)</sup>의 이론식에 통기저항값을 대입하여 계산한 음향임피던스의 결과와 잘 일치 하였으며, 주파수가 증가 할 수록 음향임피던스의 값이 감소 하였다.

측정된 지표면의 음향임피던스에 의한 소음의 초과감쇠를 조사한 결과 음향임피던스의 값이 적은 초저인 경우 반사파의 위상지연으로 인해 저주파수 영역인 600Hz 영역에서 감쇠피크가 일어났으며, 지표면의 음향임피던스가 클수록 초과감쇠의 주파수 영역이 고주파수로 이동하였다. 마이크로폰의 높이가 커질수록 저주파수로 이동하는데 이것은 경로차와 지표면에서의 위상지연 그리고 음파의 상호작용 때문이다. 따라서 소음에 노출되어 있는 지역의 소음특성에 따라 저주파수영역의 소음을 감쇠시키기 위해서는 다공성이 큰 매질로 지표면을 선택하여야 하며, 음원과 마이크로폰의 기하적 형태를 고려함으로써 소음의 감쇠효과를 크게 할 수 있다.

소음의 차음을 위해 방음벽을 설치하였을 때 음원에서 발생된 음파는 직접파와 반사파의 간섭에 의해 방음벽 뒤 지역의 음의 분포에 영향을 미치므로 반사면인 지면의 영향을 고려하여 방음 대책을 수립하여야 한다. 그리고 실제의 소음전파 환경인 시멘트도로와 초지, 초지와 아스팔트등 지표면의 음향임피던스가 불연속일 때 초과감쇠의 조사를 수행하므로써 방음을 위한 시설물 설치시 그 효과를 크게 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. M. E. Delany and E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Appl. Acoust.*, 3, 105-116(1970)
2. S. L. Yaniv, "Impedance tube measurement of propagation constant and characteristic impedance of porous materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, 54, 1138-1142(1973)
3. C. D. Smith and T. L. Parott, "Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, 74, 1577-1582(1983)
4. R. Woodcock and M. Hodgson, "Acoustic method for determining the effective flow resistivity of fi-

- brous materials," *J. Sound. Vib.*, 153(1), 186-191(1992)
5. A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two microphone random excitation technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, 61(5), 1362-1370(1977)
6. J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring induct acoustic properties," *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(3), 907-921(1980)
7. P. J. Dickinson and P. E. Doak, "Measurements of the normal acoustic impedance of ground surfaces," *J. Sound. Vib.*, 13, 309-322(1970)
8. R. J. Donato, "Impedance models for grass covered ground," *J. Acoust. Soc. Am.*, 61, 1449-1452(1977)
9. J. F. Allard, R. Bourdier and A. L'Esperance, "Anisotropy effect in glasswool on normal impedance in oblique incidence," *J. Sound. Vib.*, 114(2), 233-238(1987)
10. J. F. Allard, Y. Champoux and J. Nicolas, "Pressure variation above a layer of absorbing material and impedance measurement at oblique incidence and low frequencies," *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(2), 766-770(1989)
11. A. J. Zuckerwar, "Acoustic ground impedance meter," *J. Acoust. Soc. Am.*, 73(6), 2180-2186(1983)
12. C. I. Chessell, "Propagation of noise along a finite impedance boundary," *J. Acoust. Soc. Am.*, 62(4), 825-834(1977)
13. K. Attenborough, "Ground parameter information for propagation modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, 92(1), 418-427(1992)
14. D. Aylor, "Noise reduction by vegetation and ground," *J. Acoust. Soc. Am.*, 51(1), 197-205(1971)
15. M. A. Nobile and S. I. Hayek, "Acoustic propagation over an impedance plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(4), 1325-1336(1985)
16. T. F. W. Embleton, J. E. Piercy and N. Olson, "Outdoor sound propagation over ground of finite impedance," *J. Acoust. Soc. Am.*, 59(2), 267-277(1976)
17. T. F. W. Embleton, J. E. Piercy and G. A. Daigle, "Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements," *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(4), 1239-1244(1983)
18. 은희준 외, "간섭형 방음장치 개발연구," 한국표준연구원, 11(1986)
19. K. E. Gilbert and M. J. White, "Application of the

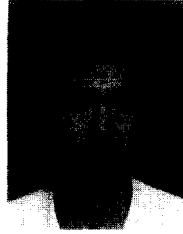
parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere," J. Acoust. Soc. Am., 85(2), 630-637 (1989)

▲김 동 일(Dong-Il Kim) 1962년 10월 29일생



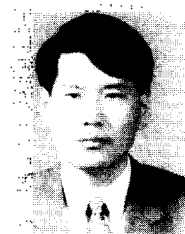
1985년 2월 : 영남대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1987년 8월 : 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
1992년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 대학원 물리학과 박사과정

▲강 병 응(Byoung-Yong Kang) 1963년 5월 5일생



1986년 2월 : 영남대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1988년 8월 : 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
1989년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 대학원 물리학과 박사과정

▲장 호 경(Ho-Gyeong Chang) 1961년 12월 6일생



1984년 2월 : 영남대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1986년 2월 : 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
1992년 2월 : 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)

1994년 3월 : 경산대학교 물리학과 전임장사

▲김 예 현(Ye-Hyun Kim) 1933년 8월 12일생



1956년 9월 : 서울대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1975년 2월 : 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
1980년 9월 : 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1980년 ~ 1981년 : 영국 University of Southampton Institute of Sound and Vibration 객원 선임 연구원

1981년 ~ 현재 : 영국 음향학회 정회원

1983년 ~ 1985년 : 한국음향학회 이사

1966년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 물리학과 교수